دراسة فيزيائية شاملة لحركة كرة البلياردو

ديناميكا كلاسيكية ونمذجة المحاكاة الفيزيائية

تحليل دقيق من لحظة النبضة حتى السكون التام

الأسس الفيزيائية: القوى والعزوم

1. القوى الخطية (Newtonian)

تتحكم في الحركة الانتقالية لمركز الكتلة:

- نبضة العصا ($J = mv_0$)
- الاحتكاك الحركي ($f_k = \mu_k mg$)
- مقاومة التدحرج ($f_r = \mu_r mg$)

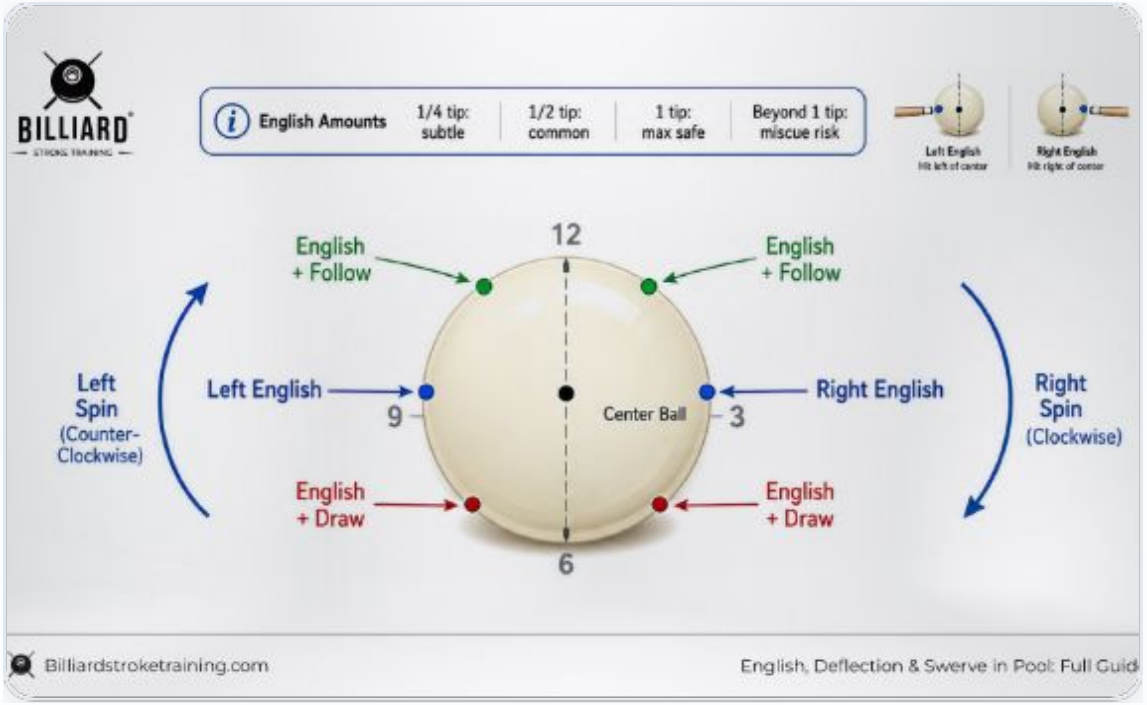
2. العزوم الدورانية (Eulerian)

تتحكم في الدوران الزاوي حول المركز:

- عزم القصور الذاتي للكرة: $I_G = \frac{2}{5}mR^2$
- عزم الاحتكاك يسبب تسارعاً زاوياً.

النقطة المثالية للضرب (Sweet Spot)

الذي يضمن تدحرجاً فورياً دون انزلاق **h** هي الارتفاع.



الاستنتاج الرياضي النهائي:

$$h = 1.4r = \frac{7}{5}r$$

- **r:أعلى من 1.4** دوران أمامي (Topspin).
- **r:أقل من 1.4** دوران خلفي (Backspin).
- **h=r: عند المركز** انزلاق بحت في البداية.

مراحل الحركة الخمس

1. التصادم

و v_0 نبضة لحظية تعطي ω_0

2. الانزلاق

احتكاك حركي يغير السرعات

3. التدحرج النقي

واختفاء ωR مع v تساوي الانزلاق

4. التباطؤ

تأثير مقاومة التدحرج الضعيفة

5. السكون

توقف كامل لكافة القوى

ميكانيكا التحول: من الانزلاق للتدحرج

مرحلة الانزلاق (Sliding)

الاحتكاك يعمل كمكبح للسرعة الخطية ومحرك للسرعة الزاوية حتى يتساويا.

$$v(t) = v_0 - \mu_k g t$$

التدحرج الطبيعي (Natural Roll)

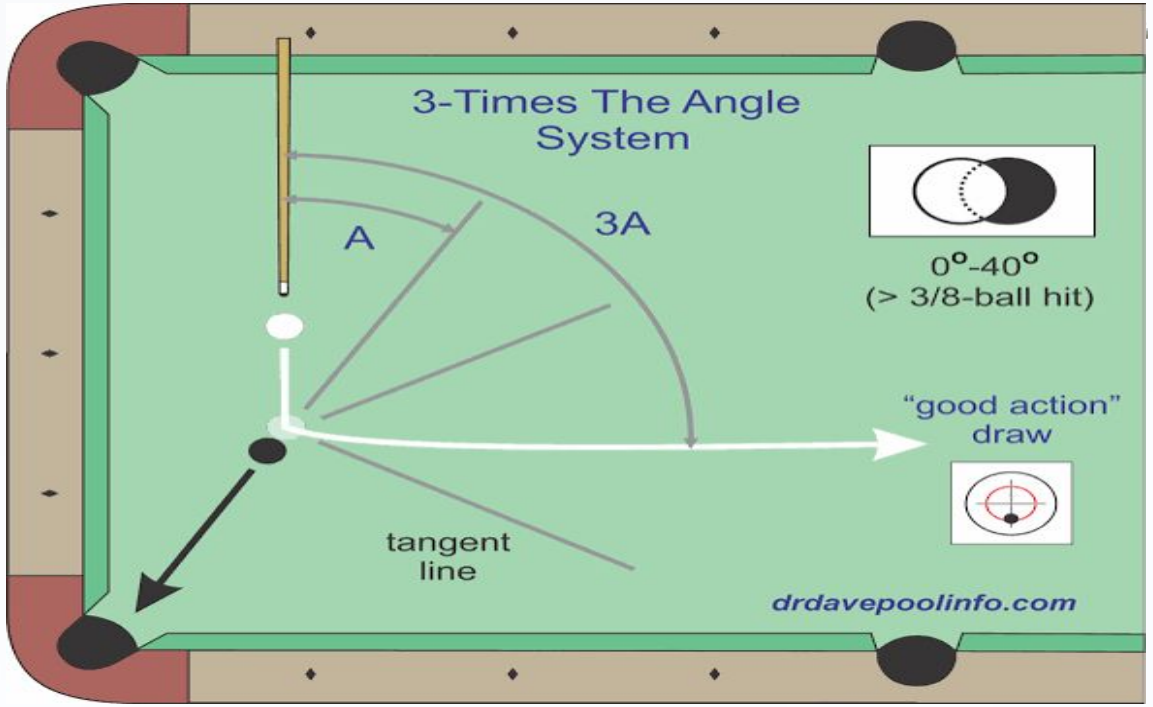
تتوقف النقطة السفلية عن الانزلاق بالنسبة للطاولة. الشرط الحاكم:

$$v = \omega R$$

فيزياء التصادم بين الكرات

لغة الهندسة، الزخم، وحفظ الطاقة

قاعدة الـ 90 درجة (90-Degree Rule)



90°

الزاوية بين مساري الكرتين بعد التصادم

تنتج هذه القاعدة من دمج قانوني:

- حفظ كمية الحركة (Momentum)
- حفظ الطاقة الحركية (Kinetic Energy)

(Break Shot) ديناميكا التصادمات المتعددة

سلاسل القوة (Force Chains)

تنتقل الطاقة فقط عبر المحور الناظم المشترك الواصل بين مراكز الكرات المتلامسة.

الاضمحلال الأسي

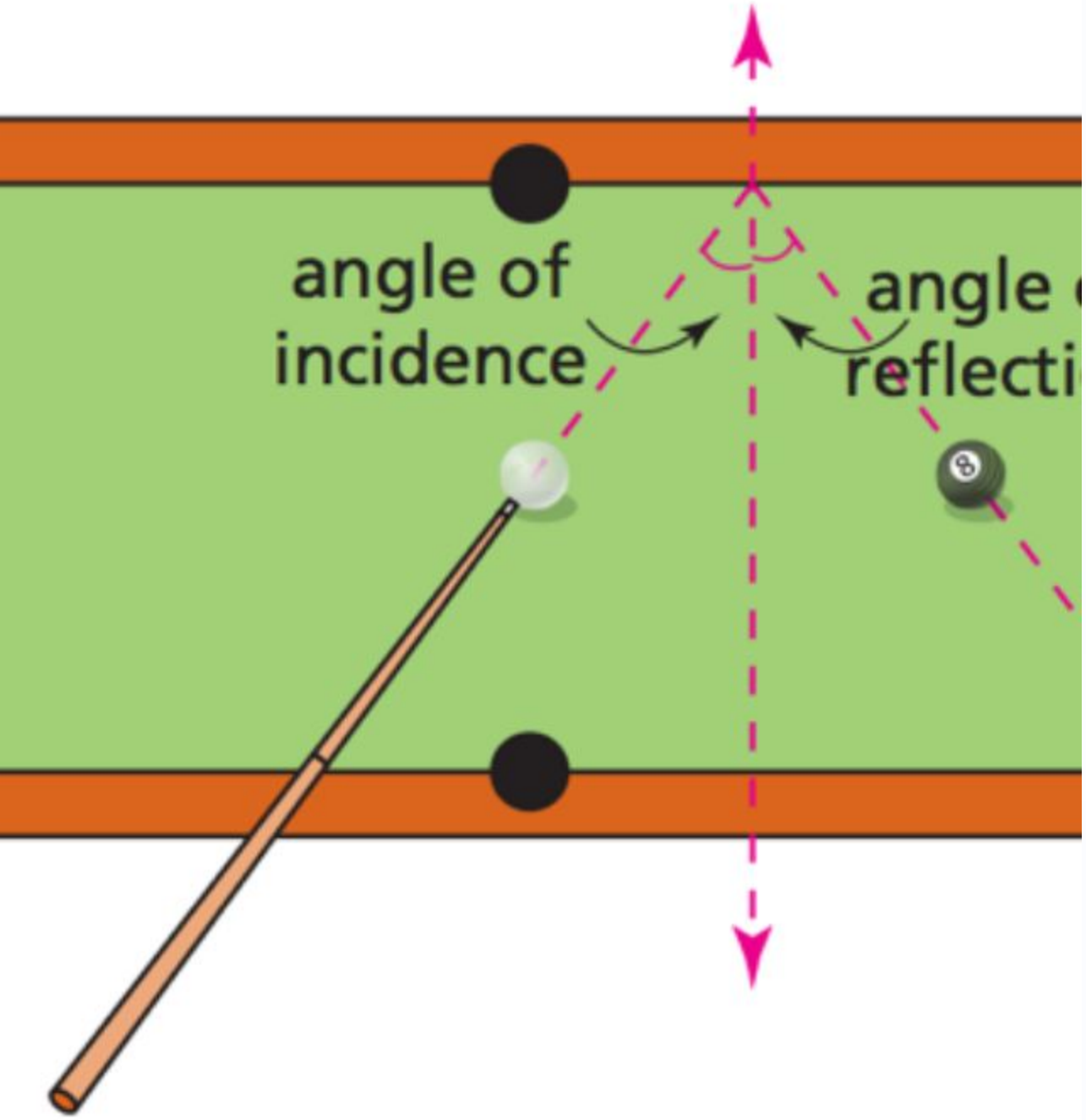
تتناقص القوة كلما تعمقنا في المثلث وفق الدالة $\cos(30^k)$

تبدد الطاقة

والتحول ($e < 1$) فقدان تراكمي للطاقة بسبب معامل الارتداد

عتبة الاحتكاك

الكرات لا تتحرك إلا إذا تجاوزت قوة الصدمة عتبة الاحتكاك الساكن



الارتداد عن الجدران

ديناميكا الحائل المطاطي

الجدار المطاطي ليس عاكسًا مثاليًا؛ بل هو سطح مرن يمتص الطاقة الميكانيكية.

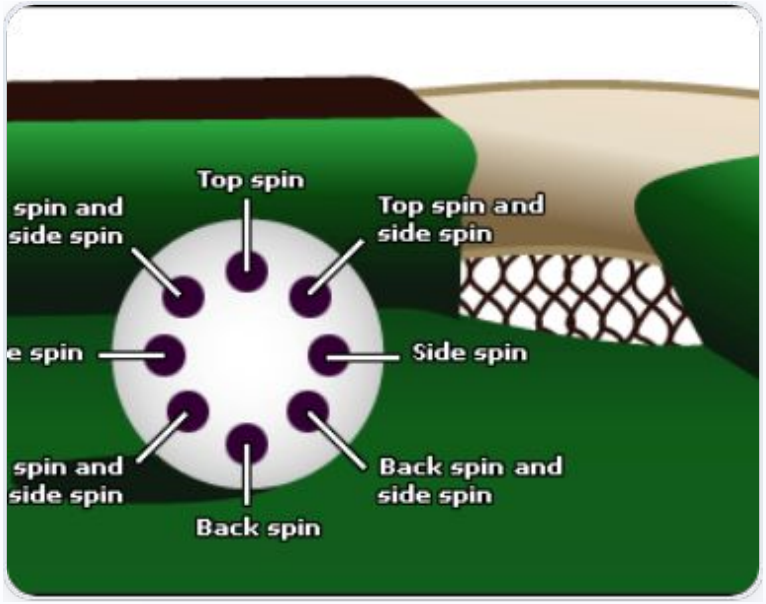
- **السرعة العمودية:** يتم امتصاصها بشدة ($v_{out} = -e_c \cdot v_{in}$).
- **السرعة المماسية:** تتأثر باحتكاك المطاط بشكل أخف.

النتيجة: زاوية الخروج دائمًا أكبر من زاوية السقوط ($\theta_{out} > \theta_{in}$).

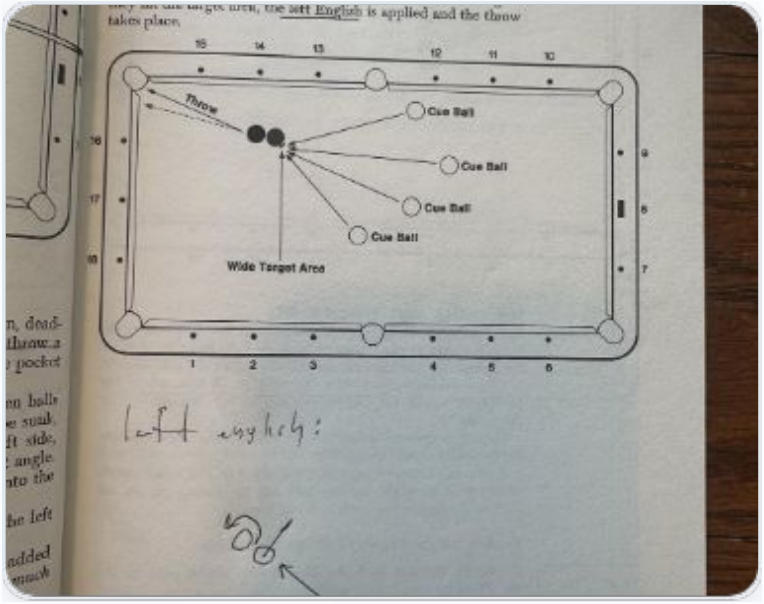
على المسار (Spin) تأثير الدوران

الدوران يغير سرعة نقطة التماس النسبية مع الجدار، مما يغير متجه قوة الاحتكاك المماسية بالكامل.

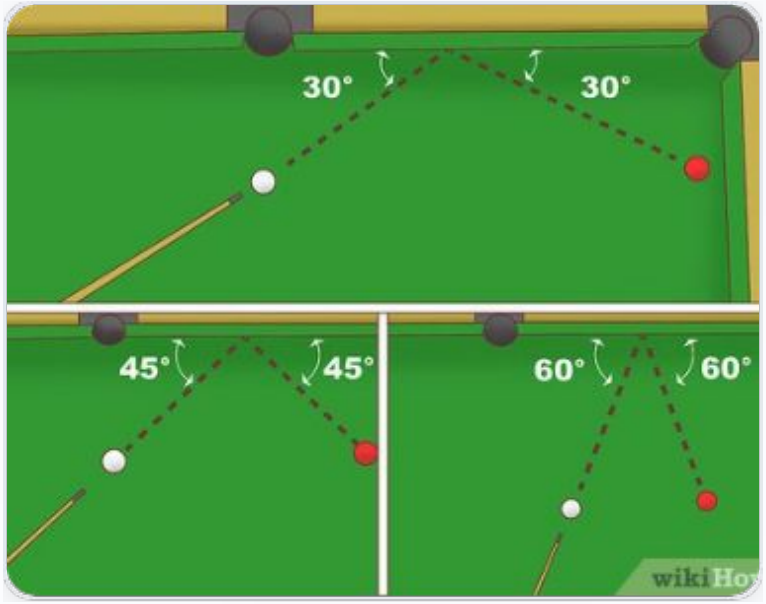
نظرة شمولية على المحاكاة



ديناميكا الدوران



توزيع الزخم



بيئة النظام